

(株) 大林組 正員 ○下村亜紀 京都大学工学部 正員 渡邊英一
 京都大学工学部 正員 古田均 京都大学工学部 正員 杉浦邦征
 京都大学工学部 正員 宇都宮智昭

1. 研究目的

将来建設が予測される大水深下(50m以深)での橋脚基礎においては、従来の重力式基礎では限界があり、杭基礎を用いたジャケット形式の柔構造タイプの基礎形式が主流になると考えられる。その実現のためには構造物自身の弾性変形を考慮した上で構造物に対する流体力を算定する必要があると思われる。そこで、本研究では最も単純な弾性円柱構造物を対象として地震時流体力を実験的に評価するために、水槽内で振動実験を行い、カルマンフィルタを用いたシステム同定手法によりこれを同定する。また、ポテンシャル理論及びモリソン式を用いて運動方程式を算出し、流体力の算定における両理論の適用性を評価する。

2. 運動方程式の導出

解析モデルをFig.1に示す。1自由度系とし、ハミルトンの原理に基づいて運動方程式を導出した結果は以下の通りである。

1)ポテンシャル理論による場合

調和振動を仮定する。単位長当たりの流体力は¹⁾

$$F(z,t) = \pi r^2 \omega^2 \left\{ \frac{\kappa \cosh(\kappa z)}{n \sinh(\kappa h) \cosh(\kappa h)} (R_{JY} - i I_{JY}) \int_0^h x(z,t) \cosh(\kappa z) dz + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\kappa \cos(\kappa_j z)}{n_j \sin(\kappa_j h) \cos(\kappa_j h)} R_j \int_0^h x(z,t) \cos(\kappa_j z) dz \right\}$$

ただし ρ は水の密度、 ω は角振動数、 R_{JY} 、 I_{JY} 、 R_j 、 n 、 n_j については文献1)を、他の諸元についてはTable1を参照のこと。

運動方程式は

$$(M_0 + M_1) \ddot{x}_t + C \dot{x}_t + K x_t = -(M'_0 + M'_1) \ddot{x}_0 - C' \dot{x}_0$$

なる形で示される。ただし、

$$M_0 = \mu \int_0^l \psi^2 dz + m$$

$$M_1 = \pi r^2 \left[\frac{\kappa}{n \sinh(\kappa h) \cosh(\kappa h)} R_{JY} \left\{ \int_0^h \psi \cosh(\kappa z) dz \right\}^2 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\kappa_j}{n_j \sin(\kappa_j h) \cos(\kappa_j h)} R_j \left\{ \int_0^h \psi \cos(\kappa_j z) dz \right\}^2 \right]$$

$$M'_0 = \mu \int_0^l \psi dz + m$$

$$M'_1 = \pi r^2 \left[\frac{\kappa}{n \sinh(\kappa h) \cosh(\kappa h)} R_{JY} \int_0^h \psi \cosh(\kappa z) dz \int_0^h \cosh(\kappa z) dz + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\kappa_j}{n_j \sin(\kappa_j h) \cos(\kappa_j h)} R_j \int_0^h \psi \cos(\kappa_j z) dz \int_0^h \cos(\kappa_j z) dz \right]$$

$$C = \pi r^2 \omega \frac{\kappa}{n \sinh(\kappa h) \cosh(\kappa h)} I_{JY} \left\{ \int_0^h \psi \cosh(\kappa z) dz \right\}^2$$

$$C' = \pi r^2 \omega \frac{\kappa}{n \sinh(\kappa h) \cosh(\kappa h)} I_{JY} \int_0^h \psi \cosh(\kappa z) dz \int_0^h \cosh(\kappa z) dz$$

$$K = \int_0^l EI \psi''^2 dz$$

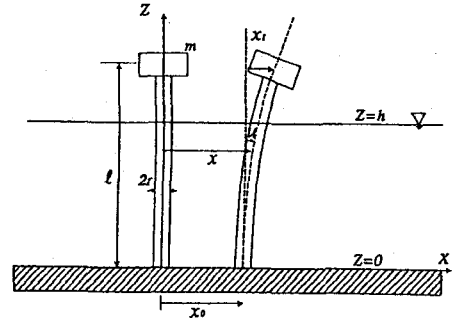


Fig.1 解析モデル

Table1 供試体諸量

	No.1 (太)		No.2 (細)	
直径 2r (mm)	60.175		38.09	
厚さ (mm)	2.05		3.40	
密度 μ (kg/m ³)	1376.2		1385.3	
断面2次モーメント I (m ⁴)	5.583 × 10 ⁻⁷		5.627 × 10 ⁻⁸	
曲げ剛性 EI (Nm ²)	5.501 × 10 ²		1.897 × 10 ²	
長さ l (m)	M_0 (kg)=0.9708	0.7700	M_0 (kg)=0.6373	0.7682
	M_0 (kg)=1.3503	0.7711	M_0 (kg)=0.9967	0.7699
	M_0 (kg)=1.6101	0.7718	M_0 (kg)=1.3762	0.7710
	M_0 (kg)=2.1194	0.7734	M_0 (kg)=1.6360	0.7717
水深 h (m)	0.6390		0.6392	

M_0 : 一般化質量

Table2 自由振動実験結果

	M_0 (kg)	空中		水中		M_1/M_0	C_m
		固有振動数 ω_0 (rad/s)	減衰定数 β (%)	固有振動数 ω_1 (rad/s)	減衰定数 β (%)		
供試体 No.1	0.9708	58.16	1.975	52.63	4.157	0.2212	0.9320
	1.3503	49.06	2.008	45.79	2.759	0.1479	0.8708
	1.6101	44.69	2.126	42.28	3.034	0.1173	0.8260
	2.1194	38.80	1.694	37.28	2.736	0.0832	0.7773
供試体 No.2	0.6373	43.61	1.644	41.17	2.016	0.1220	0.8345
	0.9967	34.69	1.467	33.55	2.031	0.0691	0.7457
	1.3762	29.29	1.467	28.70	1.930	0.0415	0.6208
	1.6360	26.70	1.416	26.30	1.948	0.0306	0.5458

2)モリソン式による場合

単位長当たりの流体力は

$$F(z,t) = -C_m \pi r^2 \ddot{x}(z,t) - C_r \pi r^2 a \dot{x}(z,t)$$

運動方程式は

$$(M_0 + M_1) \ddot{x}_i + K x_i = -(M'_0 + M'_1) \ddot{x}_0$$

なる形で表わされる。ただし、 M_0, K は1)ポテンシャル理論と同様。

$$M_1 = C_m \pi r^2 \int_0^h \psi^2 dz$$

$$M'_0 = \mu \int_0^l \psi dz + m$$

$$M'_1 = C_m \pi r^2 \int_0^h \psi dz$$

3.解析例

上式において、3次の形状関数

$$\psi = \frac{3z^2}{2l^2} - \frac{z^3}{2l^3}$$

を仮定した時の流体力係

数の計算例をFigs.2,3に示す。これらの結果からポテンシャル理論から求められる理論値は周波数及び半径水深比 r/h に依存するが、モリソン式の場合は h/l にのみ依存し、 $r/h, \kappa h$ に依存しないことがわかる。

4.実験方法

水中振動台を有する、幅90cm、高さ100cm、全長30mの二次元造波水槽において実験を行った。供試体として太さの違う2体の塩化ビニルの円筒を用いた(Table1参照)。自由振動実験においては空中及び水中で供試体頂部加速度 \ddot{x}_i を測定した。強制振動実験は加振周波数を水中自由振動実験により求められる固有振動数に一致させて行った。測定は定常状態でを行い測定項目は頂部加速度 \ddot{x}_i と入力加速度 \ddot{x}_0 とした。各実験ともデータのサンプル総数は4096点、サンプリング周期は2msecとした。

5.実験結果と考察

自由振動実験においてカルマンフィルタEK-WGI法²⁾により固有振動数 ω 、減衰定数 β の同定を行ったところ収束状況は極めて良好であった。その結果をTable2に示す。水中における固有振動数は付加質量のために空気中でのそれに比べて減少している。また、造波減衰の効果により、水中においては減衰定数が増加している。形状関数を3次とし付加質量係数 C_m が高さ方向に一様に分布していると仮定して C_m を導くと、モリソン式で通常採用される付加質量係数の値 $C_m = 1.0$ より明らかに小さいことがわかる。

自由振動時の付加質量係数を無次元化した値 M_1/M_0 と無次元化波数 κh の関係と、水中自由振動実験より求められる固有振動数に加振周波数を一致させたときの強制振動実験の結果をFigs.4,5に示す。供試体No.1では低周波側では実験値はポテンシャル理論から求まる理論値とよく一致している。しかし、高周波数になると実験値はポテンシャル理論よりも大きくなっている。供試体No.2では高周波数側でポテンシャル理論とよく一致し、低周波側ではこれより低くなっている。総合的に見ると、モリソン式よりもポテンシャル理論の方が実験値をよく説明していると言える。

自由振動実験においては構造物の応答は時間と共に急速に減衰し、これに併せて構造物により生ずる波の振幅も時間と共に変化する。すなわち、応答性状が本質的に非定常である。これは、ポテンシャル理論により導出される流体力の算出における定常状態の仮定と相容れないものであるが、それにも関わらず、同じ振動数における強制振動実験（定常状態）と良く一致したことは非定常性の影響がそれほど大きくないことを示すものと考えられる。

<参考文献>1)伊藤・木原:円柱の動揺に伴う造波抵抗,港湾術研究所報告,第11巻,第3号,pp.37-58(1972)

2)星谷・斎藤:建設技術者のためのデータ解析と応用,鹿島出版会(1991)

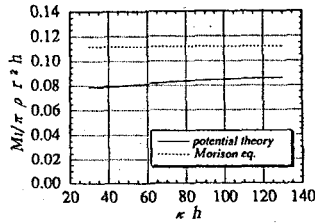


Fig.2 $M_1/\pi r^2 h$ の理論値
 $r/h=0.05, h/l=0.8$

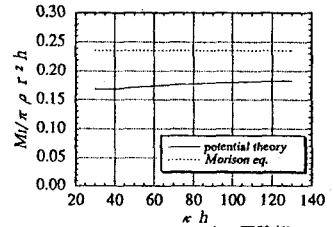


Fig.3 $M_1/\pi r^2 h$ の理論値
 $r/h=0.05, h/l=1.0$

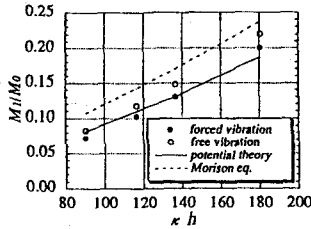


Fig.4 自由振動実験及び強制振動実験
(加振周波数 ω_1)の M_1/M_0 供試体No.1

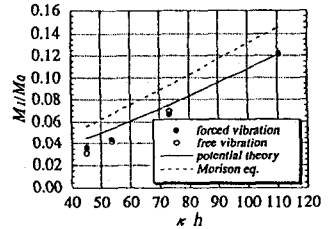


Fig.5 自由振動実験及び強制振動実験
(加振周波数 ω_1)の M_1/M_0 供試体No.2